CRAFT NNBI 射频功率源设计与分析

潘军军 刘智民 蒋才超 刘胜 陈世勇

（中国科学院等离子体物理研究所，安徽 合肥 230031）

摘要 射频功率源是负离子源中性束注入电源系统的重要组成部分，它为射频离子源产生等离子体和维持稳定放电提供射频电流，是实现中性束注入器实现高功率长脉冲运行的关键。为产生稳定的射频等离子体，射频功率源运行中必须稳定可靠。根据设计指标提出了全固态功率放大器设计结构，针对该结构对射频通路环节中的缓冲放大电路、预推动放大器、功率放大器、功率合成器、输出匹配和滤波进行了设计与分析。完成样机研制后在射频离子源上进行了等离子体放电实验，实现了 150kW 的射频等离子体放电，验证了这一拓扑结构的可行性。通过对射频功率源的研究对于未来高功率长脉冲射频离子源放电运行具有重要意义。

关键词 中性束注入；射频功率源；射频离子源；全固态功率放大器

中图分类号 TL62

DOI:

Design and Analysis of CRAFT NNBI RF Power Source

Pan Junjun Liu Zhimin Jiang Caichao Liu Sheng Chen Shiyong Hu Chundong

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)*

Abstract **[Background]**: The RF power source is an important component of the negative ion source neutral beam injection power supply system. It provides RF current for generating plasma and maintaining stable discharge of the RF ion source, and is the key to achieving high power long pulse operation of the neutral beam injector. **[Purpose]**: To generate stable RF plasma, the RF power source must be stable and reliable. **[Methods]**: According to the design index, the design structure of the all-solid-state power amplifier is proposed, and the design and analysis of the RF channel buffer amplifier, pre-push amplifier, power amplifier, power synthesizer, output matching and filtering are carried out. **[Results]**: Finally, 150kW RF plasma discharge is realized. This circuit structure is feasible on RF ion source discharging. **[Conclusions]**: The research on RF power sources is of great significance for the discharge operation of high power long pulse RF ion sources in the future.

Key words Neutral beam injection system; RF power source; RF ion source; All solid-state power amplifier

---

国家自然科学基金（No.11975263）、聚变堆主机关键系统综合研究设施项目（No.2018-000052-73-01-001228）资助

第一作者：潘军军，男，1991 年出生，2013 年于安徽工业大学获硕士学位，研究方向为中性束电源系统

通讯作者：蒋才超，E-mail: jcch@ipp.ac.cn

收稿日期：2023-00-00，修回日期：2023-00-00

Supported by National Natural Science Foundation of China (11975263), Integrated Research Facility Project for Key Systems of Fusion Reactor Host (2018-000052-73-01-001228)

First author: Pan Junjun, male, born in 1991, obtained a master degree from Anhui University of Technology in 2013, with research fields in neutral beam power supply system

Corresponding author: Jiang Caichao, email: jcch@ipp.ac.cn

射频（Radio Frequency, RF）离子源是利用稀薄气体在高频下放电使得气体电离产生等离子体的一种离子源，在由射频功率源产生具有振幅的振荡电场中，自由电子被加速并获得能量，如果与气体中的原子（或者分子）发生碰撞产生电离，电离和损耗率之间达到平衡，从而形成稳定的等离子体。射频离子源是利用电感耦合（Inductive coupling）方式产生等离子体，射频离子源是在放电室（同样由复合系数很小的材料如石英和陶瓷等材料做成）外套有多匝射频天线线圈（不处于共振模式），当在天线线圈中通入射频电流时，会产生一个轴向磁场，该磁场会感应出一个电场加速电子，与中性气体发生碰撞电离产生等离子体。因此，射频功率源的功能是为射频离子源产生等离子体和维持稳定放电提供射频电流[1-2]。

1 大功率射频功率源设计方案选择

根据 CRAFT NNBI（Comprehensive Research Facility for Fusion Technology Negative ion source Neutral beam Injection）束源的总体设计，对大功率射频功率源的总体设计性能指标如表 1 所示。

表 1 大功率射频功率源总体设计性能指标

Table 1 Overall design performance index of high power RF power source

序号 serial number	参数名称 name of parameter	设计指标 design objective
1	输入电压 input voltage	AC380V，50Hz
2	额定输出功率 output power	200kW
3	输出阻抗 Output impedance	50 Ω
4	输出功率范围 Output power range	2%-100%连续可调 2% -100% continuously adjustable
5	工作频率 working frequency	980kHz-1.02MHz
6	频率精度 Frequency accuracy	±1kHz
7	满功率效率 Full power efficiency	＞80%
8	输出信号波形 Output signal waveform	标准正弦波 sine wave

电子管结构的射频功率源体积大成本高，需要高压电源，结构复杂，效率低（低于 70%），但其工作频率较高，目前仍然在超短波及微波发射机领域应用[3]。相对于传统的电子管结构的射频功率源，全固态结构具有体积小成本低、模块化便于集成、效率高（85%以上）、功率输出和频率稳定可靠等优点。由于射频离子源工作频率为 1Mhz，因此射频功率源采用全固态功率放大器结构来设计[4-6],设计框图如图 1 所示。

设置格式[Administrator]: 上标

删除[Administrator]: 相对于传统的电子管结构的射频功率源，全固态结构具有体积小成本低、模块化便于集成、效率高（85%以上）、功率输出和频率稳定可靠等优点。射频功率源采用全固态功率放大器结构来设计[3-5],设计框图如图 1 所示。

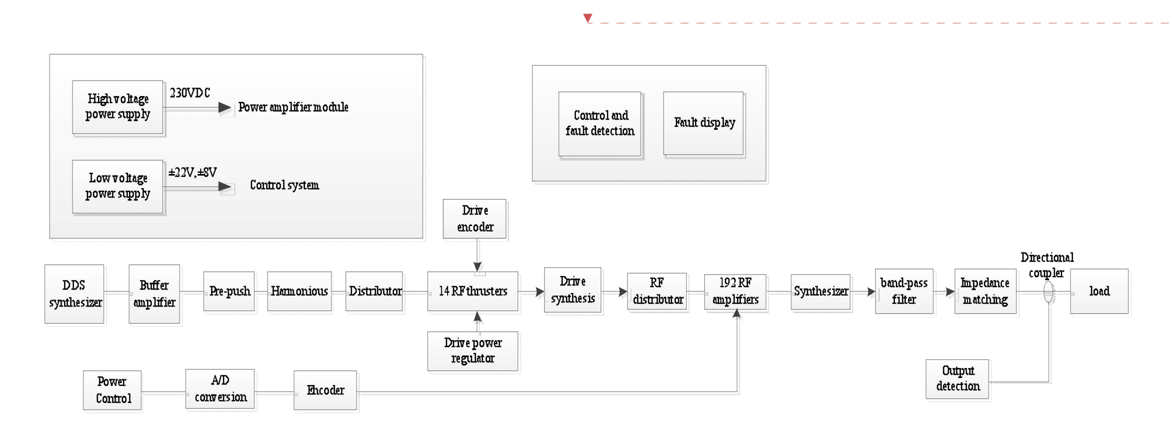


图 1 大功率射频功率源总体设计框图

Fig.1 High power RF power source overall design block diagram

2 大功率射频功率源各单元分解设计

从图 2 所示的大功率射频功率源的总体设计框图可以看出，其主结构主要由射频通路部分、功率控制、检测和显示部分、高低压电源部分组成。射频通路是本射频功率源的核心部分，该部分的功能是将产生的满足频率（1MHz）的小信号通过各级进行放大、合成、输出匹配和滤波，最终达到满足性能需求的射频功率，射频通路的框图及工作流程如图 2 所示[6-7]。

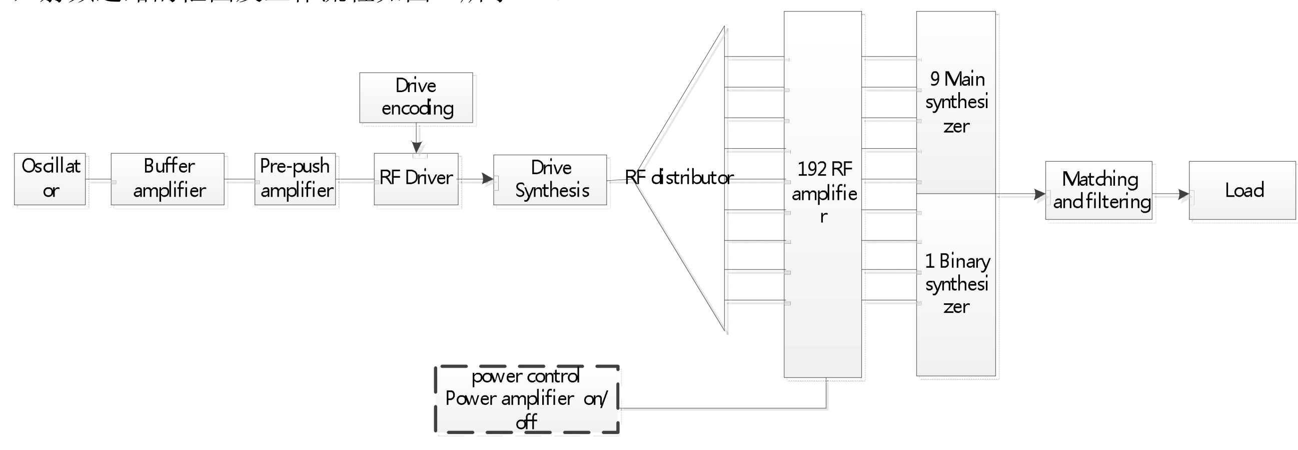


图 2 射频通路设计流程及组成框图

Fig.5 RF channel design flow and composition block diagram

2.1 激励器与缓冲放大器

激励器是整个射频电源射频链路的发端，射频电源的射频信号来源与此。振荡器给射频电源提供某一频率激励信号，并且允许外部射频信号输入。它由单频晶体经 DDS 频率合成输出 4～4.5V 的方波作为缓冲放大器的激励信号。同时具有激励封锁和驻波比保护功能[8]。

激励器输出的 TTL 方波作为缓冲放大器的输入信号。它有两个独立的放大器。缓冲放大器供电电压为 30V。输出为 25～30V 方波。缓冲放大器是一个宽带放大器，输入阻抗为 50Ω，它将 4～4.5V 频激励信号放大到预推动级栅极所需的 23V。由三级放大器组成，预推动放大器的供电电压经此板供给。

2.2 预推动放大器/末级功放模块

大功率射频功率源设计预推动放大器（1 个）、推动放大器（14 个）、末级功放放大器（192 个），这三种放大器原理、硬件结构等完全相同，可以互相代替。三种放大器在整机系统不同的位置发挥不同的作用，另外不同的功能组成中所用的放大器数量不同，比如推动级放大器，采用了 14 个功放模块，14 个模块共同组成射频推动级。

每个射频放大器模块都是由八个（两个并联为四组）N 沟道的功率 MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET）场效应管按桥式放大连接，以丁类开关放大方式工作，这种连接被叫做桥式功放。由于是丁类放大。所以模块的效率非常高，功放模块的效率可达 90%以上。丁类全桥放大保证了功率源的整体效率在 80%以上，典型值为 85%。图 3 给出了放大电路的模型[9]，下面的讨论以这个模型为基础。

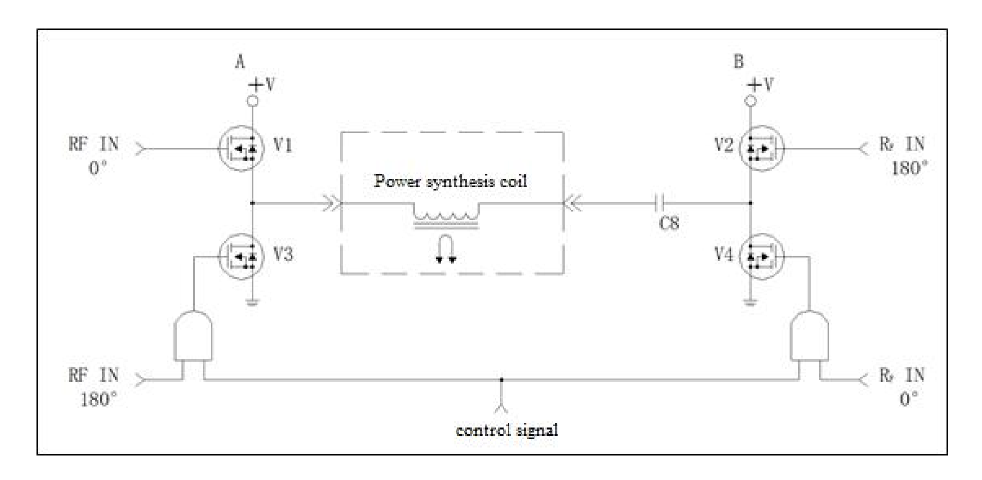


图 3 功率放大器模块模型

Fig.3 Power amplifier module model

图 4 所示为射频功率放大器的电路模型，模块每个部分由两对场效应管组成，每对场效应管轮流导通或截至，其作用好比开关，输入到两个场效应管的射频推动信号相位相差 180^0，故当上面一个场效应管导通（截至）时，下面一个场效应管截至（导通），这样输出在地电位与供电电压之间转换[10]。其工作模式如图 4 所示，4 个场效应管，在射频推动信号的相位决定下只能有两个场效应管同时通或断（除场效应管短路外）。

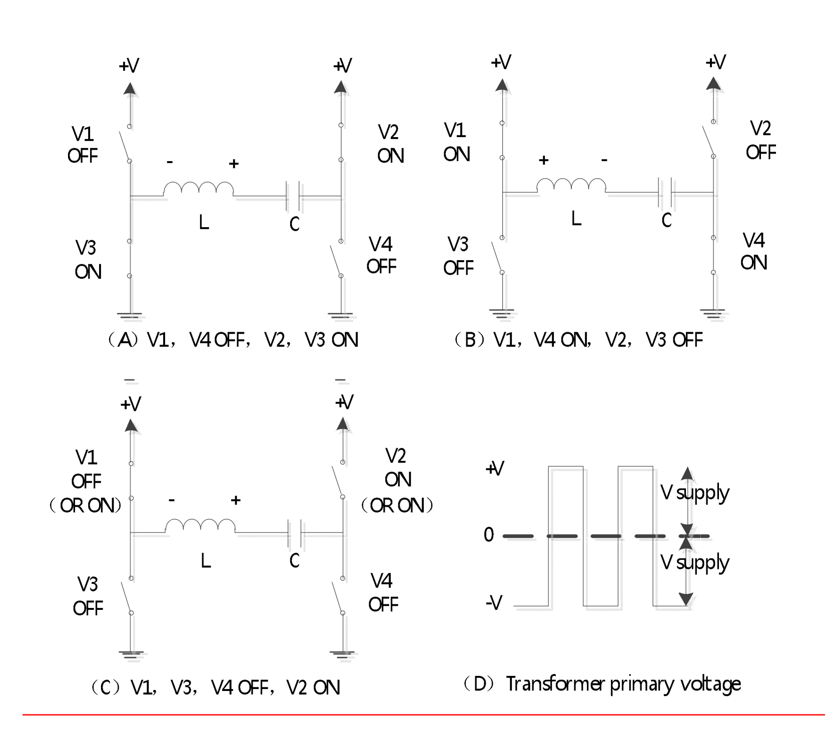


图 4 功率放大器模块全桥工作模式

Fig.4 Power amplifier module full bridge operation mode

在射频信号的上半周,V1 和 V4 截至而 V2 和 V3 导通,在射频信号的下半周,V1 和 V4 导通而 V2 和 V3 截至。开关动作将供电电压通过 C8 供给变压器初级线圈，每个推挽放大器产生一个方波输出，两组推挽放大器产生的方波相位差 180°，通过变压器初级后方波峰－峰值幅度是供电电压的两倍。且因为电抗性负载其波形会出现“振铃”。

图 4-A 所示为全桥工作模式，模块导通，A 桥工作时各功放管的状态；图 4-B 所示为全桥工作模式，

模块导通，B 桥工作时各功放管的状态；图 4-C 所示为全桥工作模式，模块关断（不导通，不工作）时各功放管的状态；图 4-D 所示为全桥工作模式，模块导通时模块的输出波形[11]。

2.3 功率合成器

来自振荡器的射频推动信号送到插接在合成器上的缓冲放大器,缓冲放大器输出为预推动级提供推动电压,预推动的输出通过推动分配器馈送到由 14 个射频放大器组成的推动器,推动器输出通过母板上合成线圈合成，再通过谐振电路,推动级输出合成送到 192 个末级射频放大模块。合成器的合成原理如图 5 所示。

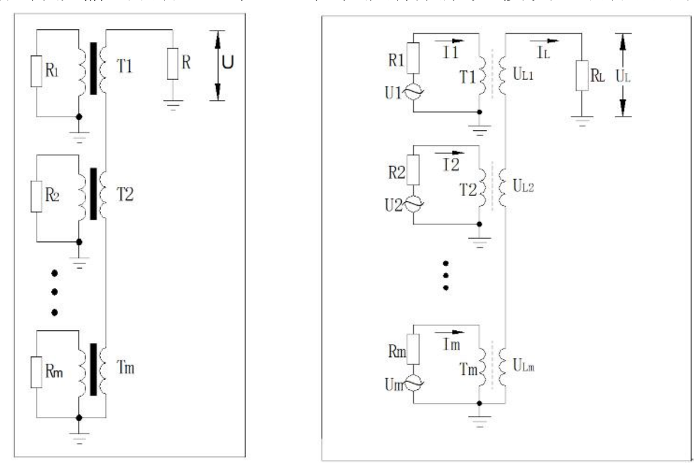


图 5　功率合成原理图

Fig.5　Schematic diagram of power synthesis

从图 5 可以看到，合成器是用高频变压器能做成功率合成网络，通常在 50MHZ 以下的高频电路中采用。图中变压器 T 具有相同的匝数比 K，$R_1 = R_2 = \cdots R_m$,$R = m\frac{R_m}{K^2}$。

该网络用于功率合成，从 R_1 、R_2、⋯R_m 两端馈入射频激励电压。如图 5 右所示[12-13]，设变压器初级：

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = \ldots U_m = U \\ I_1 = I_{12} = \ldots I_m = I \\ R_1 = R_2 = \ldots R_m = U/I = R_0 \\ P_1 = P_2 = \ldots P_m = UI = P \end{cases} \tag{1}$$

则在变压器次级可得：

$$\begin{cases} U_{L1} = U_{L2} = \ldots U_{Lm} = U/K \\ U_L = U_{L1} + U_{L2} + \ldots + U_{Lm} = mU/K \\ I_L = U_L/R_L = KU/R_o = KI \\ R_L = U_L/I_L = mR_o/K^2 \end{cases} \tag{2}$$

在负载 R_L 上获得的合成功率为：

$$P_L = I_L \bullet U_L = KI \bullet mU/K = mUI = mP \tag{3}$$

从以上可以看出，这种合成方式满足功率相加条件。

每个主功率合成器包含 16 个合成变压器 T_1～T_{16}，每个功放模块的输出通过连接器与母板上合成变压

器连接，合成器上还有 16 个带抽头的空芯线圈 L_1～L_{16} 与各自合成变压器的初级线圈并联，抽头位置取决于工作频率。主功率合成器板上还有直流供电电压，射频推动输入、调制编码控制输入等连接插件和电子线路。

2.4 输出滤波与匹配（输出网络）

大功率射频功率源输出网络将功率合成器输出的低阻抗转换为 50 Ω 输出阻抗，这个阻抗变换网络由带通滤波器和阻抗匹配网络两部分组成。带通滤波器的作用是滤除功率合成器输出信号中的谐波成份，只保留基波输出；阻抗匹配网络的作用是将馈线阻抗（50 Ω）调整为功率合成器的输出阻抗（大约 10 Ω）[14]。

射频功率源的功放工作在丁类开关放大状态，所以功放输出以及功率合成输出的电压波形为方波，其傅里叶级数分解为：

$$u(t)=\frac{4E}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(2n-1)\omega t}{2n-1}$$

$$=\frac{4E}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots+\frac{1}{2n-1}\sin(2n-1)\omega t\right)$$

$$=1.27\mathrm{E}\sin\omega t+0.423\mathrm{E}\sin 3\omega t+0.254\sin 5\omega t+\cdots$$

式中，第一项是基本波，其余为奇次高次谐波，而没有偶次谐波分量，三次谐波振幅最大，随着谐波次数的增高而振幅减小。为了抑制谐波向外辐射，射频功率源设计了仅让基频通过的带通滤波器。但是，为了保持较好的稳定性和一定的带宽，滤波器的 Q 值取得较低，这就使该滤波器对三次谐波的抑制程度不大。为了达到必要的滤波度，又在阻抗匹配网络中加设了三次谐波滤波器，进一步加强对三次谐波的抑制作用。图 6 给出了大功率射频功率源输出网络的电路图。

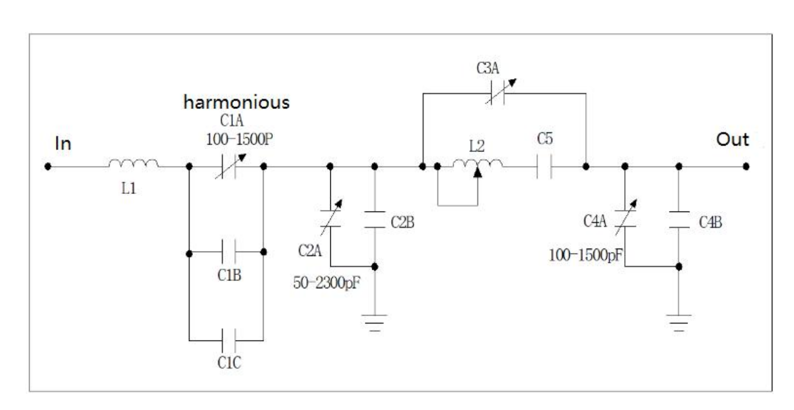


图 6 输出网络原理图

Fig.6 Output network schematic diagram

从图 6 中可以看出，射频功率源输出网络的带通滤波器部分包括 L1、C1A、C1B、C1C，L1 与 C1（C1A、C1B、C1C 并联）串联谐振在工作频率。C1A 是真空可变电容，这个电容在功率源输出网络箱的面板上可以手动调整。

π 型匹配网络包括 C2A、C2B、L2、C3A、C4A 和 C4B，C4A 是一个真空可调电容，这个电容在功率源输出网络箱的面板上可以手动调整。L2、C5 串联谐振于工作频率，对三次谐波呈感性并与 C3 并联谐振于工作频率的三次谐波频率，L2、C5、C3A 组成的三次谐波滤波网络对工作频率来说呈现感性，与左右两边的电容构成低通型 π 型阻抗匹配网络。C4（C4A、C4B 并联）的作用是调载（负载调整主要调整复阻抗的实部）[15-16]。

3 实验

首先在 50 欧姆假负载上进行了满功率长脉冲测试，达到了 200kW@1000s 输出，如图 7 所示。为验证全固态大功率射频功率源在射频等离子激发上的应用，进行了等离子体激发实验。由于驱动器阻抗与功率源阻抗存在一定的差异，同时驱动器阻抗会随着放电功率的增加货进气量的变化也会发生改变，因此在等离子体激发实验中存在一定的驻波比。图 8 给出了射频离子源在 140 kW@15s 高功率等离子体放电的波形，横坐标为放电时间，纵坐标为功率，黑色为入射功率波形，红色为驻波比波形，等离子放电稳定后入射功率约 140kW，驻波比约为 1.1。实验结果证明本文提出的全固态功率放大器结构是合理可行的。

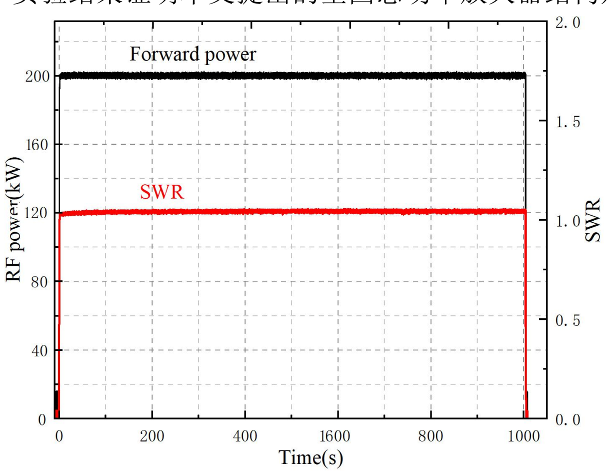


图 7 射频功率源假负载放电波形

Fig.7 RF Power outputs waveform on 50 Ω load

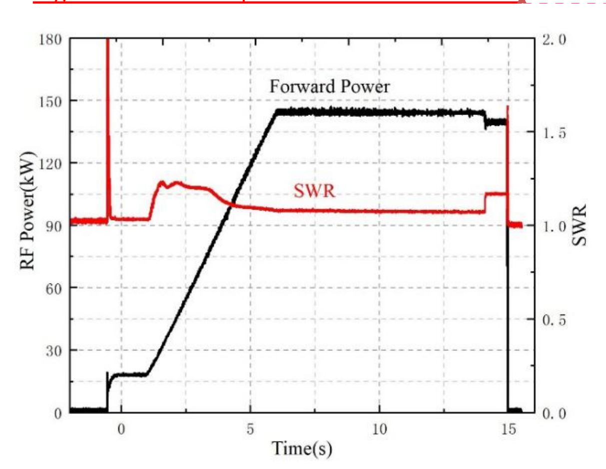


图 8 射频离子源放电波形

Fig.8 RF Power outputs waveform on RF ion source

删除[Administrator]: 在

设置格式[Administrator]: 图标题，左，缩进：首行缩进：0 毫米，行距：单倍行距，制表位：不在 2 字符，对齐到网格

设置格式[Administrator]: 字距调整：0 磅

4 结语

通过对大功率射频功率源分解研究，完成了满功率长脉冲的假负载测试和射频离子源放电测试，证明全固态放大器的大功率射频功率源在 RF 离子源上的应用是可行的。RF 离子源凭借其具备长脉冲甚至稳态运行的优势，成为未来聚变堆装置上 NBI 首选离子源。大功率 RF 离子源的研究，是当前中性束相关领域的前沿科研内容。开展大功率射频功率源的研发是获得稳定等离子体放电的关键环节，具有重要的科学意义。本研究为 CRAFT NNBI 项目开展的负离子束引出奠定了基础，同时为我国发展大面积高功率射频离子源关键技术积累了工程设计和实验，对提升我国受控核聚变事业的研究水平具有重要意义。

确定论文署名后，每位作者均须作贡献说明：

作者贡献声明

潘军军负责射频功率源的的设计与理论分析分析；刘智明负责实验数据采集等；蒋才超负责负载即射频离子源的的准备；刘胜、陈世勇负责实验运行与数据分析。

参考文献

1 胡纯栋, 梁立振, 谢远来, 等. CFETR 中性束注入系统概念设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, 42(4): 388–392. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202204005.

HU Chundong, LIANG Lizhen, XIE Yuanlai, et al. Conceptual design of neutral beam injection system for CFETR[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2022, 42(4): 388–392. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202204005.[知网中文][知网英文]

2 谢亚红, 胡纯栋, 韦江龙, 等. CFETR 中性束注入系统负离子束源概念设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(4): 628–634. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202104008.

XIE Yahong, HU Chundong, WEI Jianglong, et al. Conceptual design of negative ion based beam source for CFETR neutral beam injector[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(4): 628–634. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202104008.[知网中文][知网英文]

3 W. Kraus, U. Fantz, B. Heinemann, P. Franzen, Solid state generator for powerful radio frequency ion sources in neutral beam injection systems, Fusion Engineering and Design,Volume 91,2015,Pages 16-20,ISSN 0920-3796.

4Yang P Q, Liu B, Jiang C C, et al. Impedance characteristic analysis and preliminary experimental results of a high-power RF plasma source[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(4): 775–781. DOI: 10.1109/TPS.2022.3154397.[LinkOut]

5 王钊，王明伟，雷涛，等. NNBI 射频功率源输出功率控制系统设计[J]. 核技术，2023, 46(1): 010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010402.

WANG Zhao, WANG Mingwei, LEI Tao, et al. Design of NNBI RF power source output power control system[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1): 59–66. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010402.[万方]

6 蒋才超. 大功率 RF 离子源功率馈入关键技术及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.

JIANG Caichao. Key technology and experimental study on power feed-in of high power RF ion source[D].Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.[知网]

7 丁洪利，赵明华，肖诚成，等. 250 MHz 固态功率放大器的设计[J]. 核技术，2016, 39(6): 060401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060401.

DING Hongli, ZHAO Minghua, XIAO Chengcheng, et al. Design of a 250-MHz solid-state power amplifier[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(6): 060401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060401.[知网中文][知网英文]

8 金珂安，孙列鹏，施龙波，等. 固态功率源功放模块反射功率过荷分析[J]. 核技术，2019, 42(3): 030203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030203.

JIN Kean, SUN Liepeng, SHI Longbo, et al. Analysis of the over-loaded reflection of solid state power amplifier module[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(3): 030203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030203.[知网中文][知网英文]

9 肖永川，欧阳华甫，薛康佳，等. 中国散裂中子源 RFQ 的研制[J]. 核技术，2015, 38(12): 120201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.120201.

XIAO Yongchuan, OUYANG Huafu, XUE Kangjia, et al. Development of CSNS RFQ[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(12): 120201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.120201.[知网中文][知网英文]

10 丁洪利. 固态射频功率源的研究与设计[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.

DING Hongli. Research and design of solid-state RF power source[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.[知网]

11 雷钰, 纪彬, 李鹏展, 等. 强流回旋加速器射频功率源末级谐振放大器的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(3): 244–247, 258. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.03.006.

LEI Yu, JI Bin, LI Pengzhan, et al. The development of the final-stage resonant amplifier of the RF power source for high intensity cyclotron[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(3): 244–247, 258. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.03.006.[知网中文][知网英文]

设置格式[Administrator]: 字体: (默认) Times New Roman, 小五, 图案: 清除(白色), 字体颜色: 自定义颜色(RGB(0,0,250)), 英语(美国)

设置格式[Administrator]: 缩进: 左侧: 0 毫米, 首行缩进: 0 毫米

设置格式[Administrator]: 图案: 清除(白色)

12 舒先来，刘智民，谢亚红，等. 负离子源全固态大功率射频源功率控制策略分析[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(1): 70–76. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.01.012.

SHU Xianlai, LIU Zhimin, XIE Yahong, et al. Analysis of the power control strategy of the all-solid-state high-power RF source of the negative ion source[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(1): 70–76. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.01.012.[万方]

13Jiang C C, Hu C D, Wei J L, et al. Design of power supply system for the prototype RF-driven negative ion source for neutral beam injection application[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 117: 100–106. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.02.091.[LinkOut]

14 刘克富. 固态 Marx 发生器研究进展[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781－1787. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.06.003.

LIU Kefu. Research progress in solid-state Marx generators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1781－1787. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.06.003.[知网中文][知网英文]

15 阳璞琼，刘波，蒋才超，等. 大功率射频离子源驱动器等效阻抗特性分析[J]. 核技术, 2021, 44(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080603.

YANG Puqiong, LIU Bo, JIANG Caichao, et al. Analysis of equivalent impedance characteristics of a high power RF ion source driver[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080603.

16 Jiang C C, Hu C D, Xie Y H, et al. Analysis and experimental study of impedance matching characteristic of RF ion source on neutral beam injector[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(7): 2677–2679. DOI: 10.1109/TPS.2017.2778724.[LinkOut]

17 Huh S R, Park M, Jung B K, et al. Preliminary design of an impedance matching circuit for a high power rectangular RF driven ion source[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 121: 337–341. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.04.121.[LinkOut]

删除[Administrator]: 1

论文发表申请表

申请人	潘军军	申请日期	2023.7.27
论文中英文标题	CRAFT NNBI 射频功率源设计与分析 **Design and Analysis of CRAFT NNBI RF Power Source**		
拟发表期刊名称	核技术		
基金支持（可选填）	1. 国家自然科学基金（No.11975263） 2. 3.		
研究室审查意见	**1.** ☐有署名排序异议　☑无署名排序异议 **2.** ☐有一稿多投情况　☑无一稿多投情况 **3.** ☐有涉密内容　☑无涉密内容 全体作者签名（按署名顺序）： 潘军军 刘智民 蒋才超 刘胜 陈世勇 课题负责人或导师： 2023年 7月 27 日 部门负责人： 2023年 7月 27 日		
保密审查	经审查，本论文无涉密内容，同意投稿。 （单位签名及公章） 中国科学院合肥物质科学研究院 安全保密处 年　月　日		

保密员
刘春兰
朱升秀
61205